

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

DESKRIPCE RŮZNÝCH DRUHŮ PŘEVODOVEK **HARMONIC-DRIVE**

DESCRIPTION OF DIFFERENT SORTS OF HARMONIC-DRIVE GEAR BOX

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN BRUS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. ZDENĚK KOLÍBAL, CSc.

BRNO 2008

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jan Brus

Bytem: Dobrá Voda 17, Jablonec nad Nisou, 46606, ČR

Narozen/a (datum a místo): 10.12.1983, Jablonec nad Nisou

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

se sídlem Technická 2896/2, 616 69, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Deskripce různých druhů převodovek Harmonic-Drive

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Datum obhajoby VŠKP: 7. listopadu 2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v *:

- ☐ tištěné formě – počet exemplářů
- ☐ elektronické formě – počet exemplářů

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Bakalářská práce obsahuje odbornou rešerši, popisující různé druhy harmonických převodovek. Rešerše se zabývá popisem vlastností a možností aplikace jednotlivých druhů harmonických převodovek, včetně pracovních charakteristik (grafů), rozboru jednotlivých částí a principu činnosti. Dále je zde srovnání s jinými druhy běžně používaných převodovek (cykloidní, klasické). V závěru jsou shrnuty výhody a nevýhody harmonických převodovek, zaměřené na použití a vlastnosti.

ABSTACT

The Bachelor's thesis contains a technical search describing different sorts of harmonic drive gear-boxes. The search is engaged in the description of characteristics and possibilities of the application of particular sorts of harmonic drive gear-boxes, including operating characteristics (graphs), analysis of individual parts and the principle of operation. Further a comparison with other types of commonly used gear-boxes (cycloidal, classical gear-boxes) are presented. In the end the advantages and disadvantages focused on the usage and characteristics are summarized.

Klíčová slova: Harmonické převodovky, charakteristiky harmonických převodů

Key words: Harmonic drive gear-boxes, characteristics of harmonic drive gearing

Bibliografická citace:

BRUS, J. *Deskripce různých druhů převodovek HARMONIC-DRIVE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 29 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 10. 2008

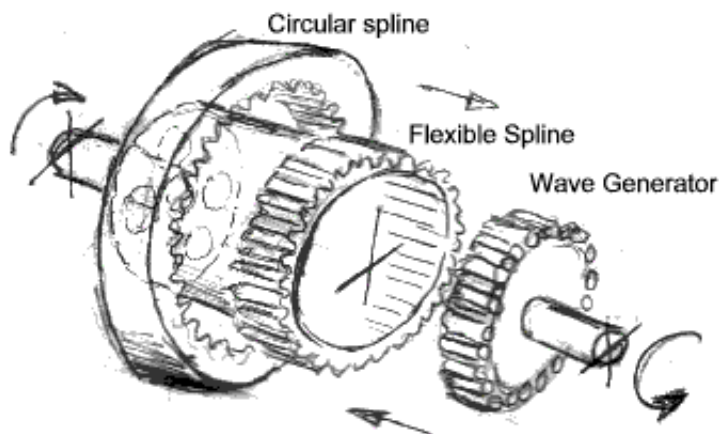
.....
podpis

OBSAH

1 ÚVOD	8
2 PŘEVODY A OZUBENÍ	9
2.1 Význam a základní pojmy ozubených převodů	9
2.2 Kinematická geometrie ozubení	10
2.2.1 Cykloidní ozubení	10
2.2.2 Evolventní ozubení	11
2.3 Planetové převody	11
3 HARMONICKÉ PŘEVODOVKY	12
3.1 Části harmonické převodovky	12
3.1.1 Eliptický generátor vln	12
3.1.2 Pružné ozubené kolo	12
3.1.3 Tuhé ozubené kolo	12
3.2 Ozubení v harmonických převodovkách	13
3.3 Princip harmonických převodovek	14
3.4 Vlastnosti harmonických převodovek	15
3.4.1 Převodový poměr	15
3.4.1.1 Vliv aplikace komponentů na převodový poměr	15
3.4.2 Účinnost převodu	17
3.4.3 Mrtvý chod a tuhost	17
3.4.4 Přetížitelnost převodu	17
3.4.5 Životnost převodu	17
3.4.6 Ostatní vlastnosti	17
4 TYPY HARMONICKÝCH PŘEVODOVEK	18
4.1 Komponenty H-D převodovek	18
4.1.1 Řada HFUC	18
4.1.2 Řada CSG	19
4.1.3 Řada CSD	21
4.1.4 Řada HFUS	22
4.2 Typy převodovek	23
4.2.1 Řada PMG	23
4.2.2 Řada CSF	23
4.2.3 Použití H-D převodovek	24
4.3 Planetové převodovky řady HPG	24
4.4 Servomotory, servo akční členy a regulátory	25
5 SROVNÁNÍ RŮZNÝCH TYPŮ PŘEVODOVEK S HARMONIC-DRIVE	27
6 PŘÍKLADY POUŽITÍ PŘEVODOVEK HARMONIC-DRIVE	28
7 ZÁVĚR	28

1 ÚVOD

Princip HARMONIC-DRIVE si nechal v roce 1955 patentovat Američan Walter Musser. Na obrázku 2 je znázorněn náčrt harmonické převodovky, jak si jej pravděpodobně pan Musser připravil.



Obr. 1 Skica HD převodovky

Zpočátku byl další vývoj prováděn pouze pro NASA (National Aeronautics and Space Administration, Národní úřad pro letectví a kosmonautiku).

Později v roce 1970 společnosti USM Corporation (Boston) a Hasegawa Gear Works (Tokyo) zakládají dva nové závody, a sice *Harmonic Drive System GmbH* v Německu a *Harmonic Drive Systems Inc.* v Japonsku, s úmyslem celosvětově rozšířit produkci harmonických převodů na průmyslovém trhu. Požadavky trhu nutily společnost k neustálému vývoji a rozšiřování nabídky různých typů a velikostí těchto přesných převodovek. Tento produkt je v první řadě používán v průmyslových robotech, obráběcích a tiskařských strojích.

Evropský letecký průmysl začal využívat harmonické převody roku 1976 a to hlavně kvůli vysoké přesnosti a nízké váze těchto převodů.

Vzhledem ke stále se zvyšujícím nárokům na přesnost výroby a rozšíření automatické výroby je převodovek HARMONIC-DRIVE, i přes relativní složitost jejich kompletace a finanční náročnost na ni, stále více využíváno.

V roce 2006 vzniká společnost *HARMONIC-DRIVE LLC* složená z původních *HD Systems, Inc.* a *Harmonic Drive Technologies, Nabtesco, Inc.*, která se stává celosvětovým distributorem a zároveň servisním střediskem harmonických převodovek.



Obr. 2 Loga firem

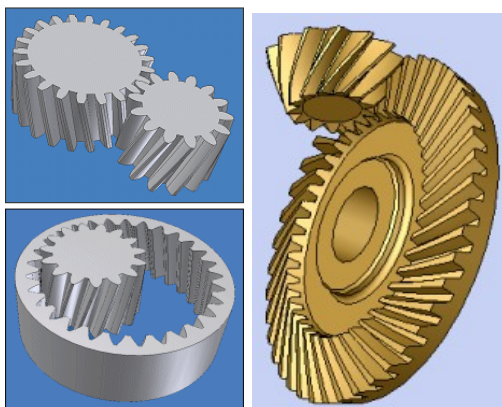
2 PŘEVODY A OZUBENÍ

2.1 Význam a základní pojmy ozubených převodů

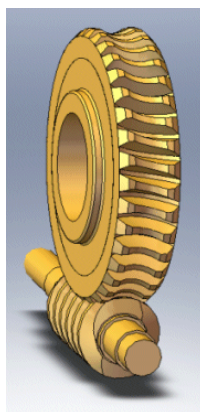
Významem převodů je přenos otáčivého pohybu z jednoho prvku zařízení na druhý s možností změny úhlové rychlosti a vzájemné polohy prvků. Pro tento přenos je možno využít převodů třecích, řemenových, řetězových a převodů ozubenými koly. Vzhledem k tomu, že u zařízení potřebujeme dosáhnout jisté přesnosti a velikosti, je ve většině případů použito převodů ozubenými koly. Oproti převodům třecím jsou bez prokluzu (přesnost) a oproti převodům řemenovým a řetězovým jsou menší (velikost).

Ozubené převody umožňují plynulý přenos otáčivého pohybu a krouticího momentu s pevně daným převodovým poměrem mezi dvěma osami. Pohyb se přenáší tak, že zuby jednoho ozubeného kola zapadají do zubových mezer kola druhého. Ozubená kola, která spolu zabírají, se nazývají soukolí.

Soukolí jsou rozdělena dle vzájemné polohy os, mezi kterými jsou pohyb a moment přenášeny na čelní, kdy jsou osy rovnoběžné, kuželové, kdy jsou osy různoběžné a šnekové, kdy jsou osy mimoběžné.



Obr. 3 Čelní soukolí vnější a vnitřní; kuželové soukolí



Obr. 4 Šnekové soukolí

2.2 Kinematická geometrie ozubení

Tvar zubů a mezer musí splňovat podmínku stálého převodového poměru, tzn. při konstantní úhlové rychlosti hnacího kola, musí být konstantní úhlová rychlost kola hnaného.

Převodový poměr soukolí: $i = \omega_2/\omega_1 = f_2/f_1 = r_1/r_2 = z_1/z_2$

Kde:

ω_1 [rad] – úhlová rychlost hnacího kola

ω_2 [rad] – úhlová rychlost hnaného kola

f_1 [Hz] – frekvence otáčení hnacího kola

f_2 [Hz] – frekvence otáčení hnaného kola

r_1 [mm] – poloměr hnacího kola

r_2 [mm] – poloměr hnaného kola

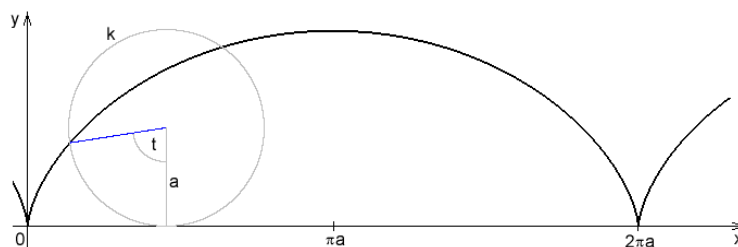
z_1 [-] – počet zubů hnacího kola

z_2 [-] – počet zubů hnaného kola

Této podmínce vyhovuje pouze ozubení, jehož profil je ve tvaru cykloidy nebo evolventy.

2.2.1 Cykloidní ozubení

Cykloida je křivka, kterou opisuje bod tvořící kružnice při jejím valení po přímce. Cykloidní ozubení vykazuje menší ztráty třením a menší opotřebení než ozubení evolventní. Výroba tohoto ozubení je ale náročnější, proto se využívá méně. V dnešní době je využito v cykloidních převodovkách, cykloidních čerpadlech a také mechanických hodinách.

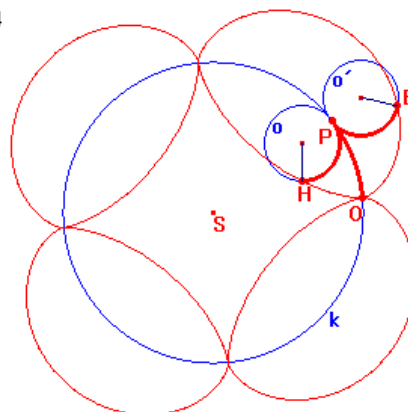


Obr. 5 Konstrukce cykloidy

Epicykloida (*epi-z řečtiny; nad, při, na, na povrchu*) je křivka, kterou opisuje bod tvořící kružnice při jejím valení zevně po jiné, základní kružnici. Epicykloida tvarem odpovídá cykloidě.

Hypocykloida (*hypo-z řečtiny; pod, spodní*) je křivka, kterou opisuje bod tvořící kružnice valící se zevnitř po základní kružnici.

4



Obr. 6 H-hypocykloida; E-epicykloida

2.2.2 Evolventní ozubení

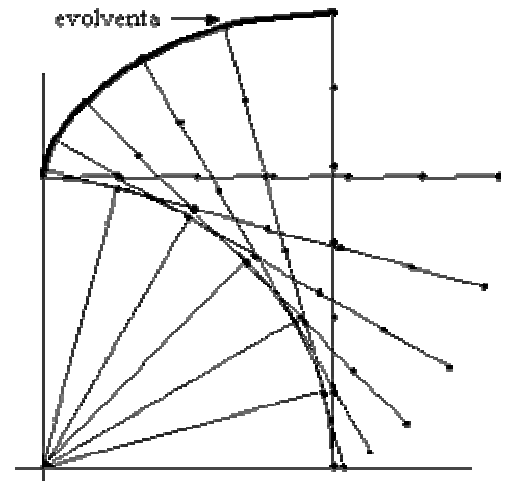
Evolventa je křivka, kterou opisuje bod tvořící přímkou při jejím valení po základní kružnici.

Parametrické rovnice evolventy (pro střed základní kružnice v počátku souřadnicového systému):

$$x = r \cos t + rt \sin t$$

$$y = r \sin t - rt \cos t,$$

kde r je poloměr kružnice.

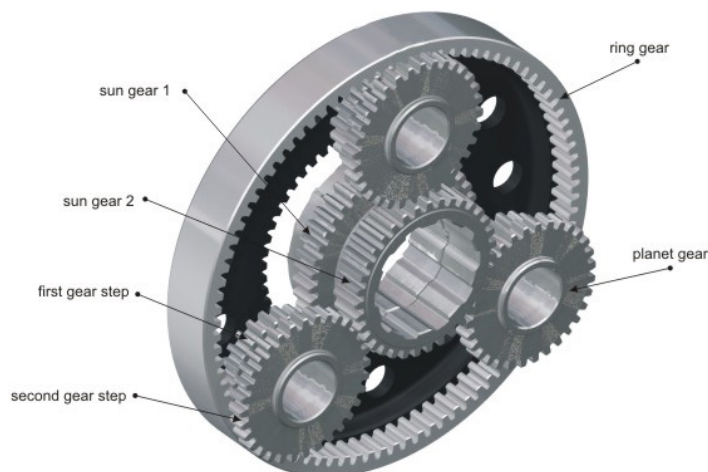


Obr. 7 Konstrukce evolventy

Evolventní ozubení je nejrozšířenějším ozubením ve strojírenství. Používá se hlavně kvůli snadné a relativně levné výrobě, splnění podmínek pro přenos konstantního převodového poměru a normalizaci nástrojů na jeho výrobu. U evolventního ozubení jsou sice relativně větší ztráty třením a větší opotřebení než u ozubení cykloidního, náklady na jeho výrobu však tyto snížené podmínky vynahrazují.

2.3 Planetové převody

Planetové převodovky používají zuby s evolventním ozubením. Tyto se skládají z centrálního kola, satelitů uložených na otočném unášeci a korunového kola s vnitřním ozubením. Satelity se zároveň otáčejí na čepech unášече a okolo centrální osy převodovky. Využívají se např. v diferenciálech.

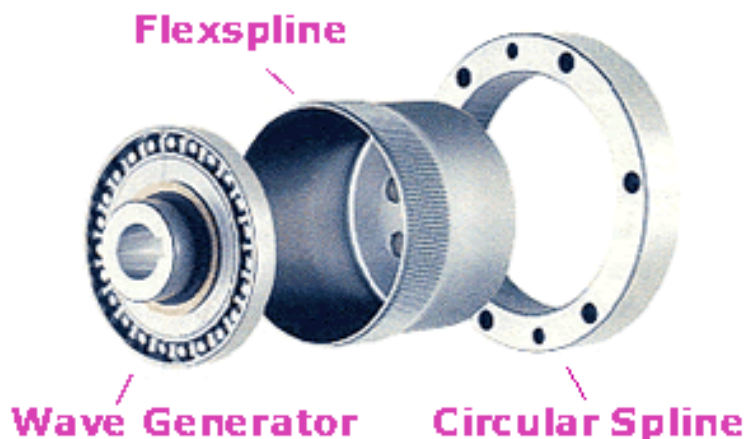


Obr. 8 Planetová převodovka

3 HARMONICKÉ PŘEVODOVKY

3.1 Části harmonické převodovky

Harmonická převodovka se skládá ze tří prvků (Obr. 9). Generátor vln (Wave generator), pružné ozubené kolo (Flexspline), tuhé ozubené kolo (Circular spline).



Obr. 9 Části harmonické převodovky

3.1.1 Eliptický generátor vln (wave generator)

Je eliptická vačka s nalisovaným speciálním pružným kuličkovým ložiskem, které deformuje pružné ozubené kolo. Generátor vln je většinou spojen přímo s hřídelí motoru. Tato vačka je posledním idealizovaným řešením tohoto členu. Předchůdci byly čtyřkotoučový generátor vln a vícekotoučový generátor vln.

3.1.2 Pružné ozubené kolo (Flexspline)

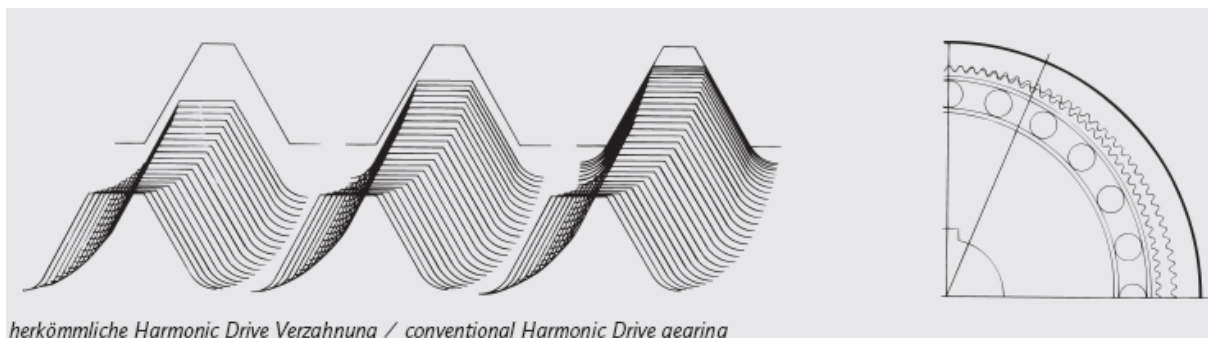
Je pružný ozubený válec s vnějším ozubením, jehož zuby v místě hlavní eliptické osy při deformaci generátorem vln zabírají do zubových mezer tuhého ozubeného kola. Toto kolo je dle požadavků na použití vyráběno v různých tloušťkách a s různými výstupy, např. na přírubu či dutou hřídel.

3.1.3 Tuhé ozubené kolo (Circular spline)

Je tuhý ocelový kroužek s vnitřním ozubením s počtem zubů o dva větším než pružné kolo. V důsledku rozdílu počtu zubů dochází k relativnímu pohybu mezi pružným a tuhým kolem, což umožňuje dosáhnout vysoký převodový poměr.

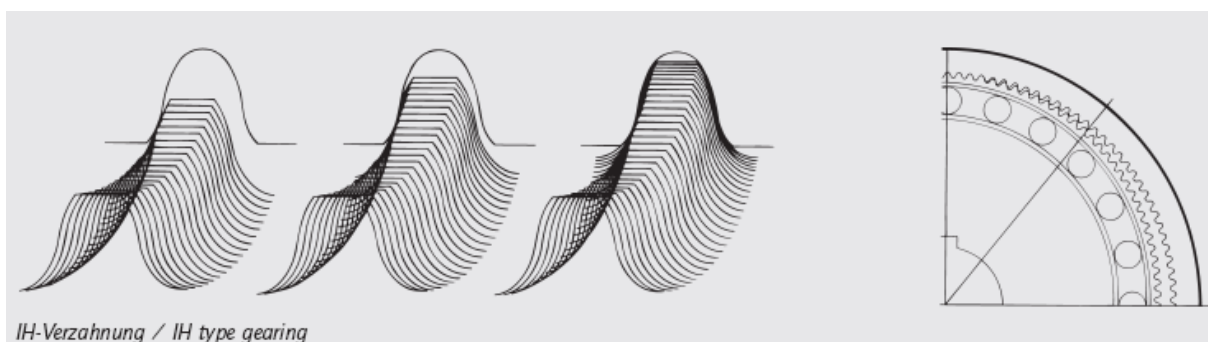
3.2 Ozubení v harmonických převodovkách

Z počátku bylo u harmonických převodovek používáno ozubení s lichoběžníkovými zuby. Tyto převodovky měly v záběru 15 – 20 % zubů, což umožňovalo přenášet relativně vysoký krouticí moment. Docházelo zde ale k opotřebení zubů, hlavně jejich špiček, a důsledku toho se snižovala přesnost a opakovatelnost.



Obr. 10 Původní ozubení harmonických převodovek

Z důvodu zvyšování nároků na přesnost byl vyvinut nový typ ozubení pro harmonické převodovky označovaný jako „IH“. U tohoto nového typu ozubení má bok zubu tvar evolventy a zlepšují se tím samozřejmě vlastnosti ozubení. Díky tomu, že je zde v záběru až 30 % zubů dochází k dalšímu navýšení přenositelného krouticího momentu, zvýšení torzní tuhosti a také zvýšení životnosti převodu. Dále má tento typ nulový mrtvý chod a z toho vyplývající přesnost a opakovatelnost.



Obr. 11 Nový typ ozubení „IH“

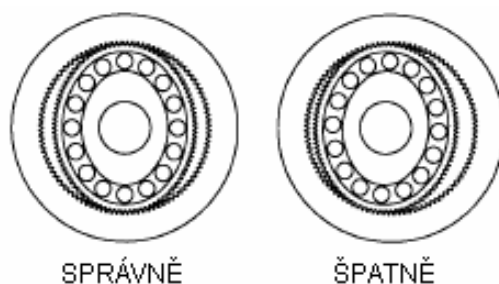
3.3 Princip harmonických převodovek



Obr. 12 Princip harmonické převodovky

1. Pružné kolo s vnějším ozubením a počtem zubů o dva menším než tuhé kolo je deformované přes eliptický generátor vln, na který je přiváděn vstupní otáčivý pohyb, a jeho zuby zapadají do zubových mezer tuhého ozubeného kola v místě hlavní eliptické osy.
2. Při otáčení generátoru vln ve směru hodinových ručiček se posouvá záběrová zóna s hlavní eliptickou osou.
3. Při otočení generátoru vln o 180° ve směru hodinových ručiček se relativně posune pružné kolo vůči tuhému kolu v opačném směru o jeden zub.
4. Při úplném otočení generátoru vln se posune pružné kolo o 2 zuby vůči tuhému kolu v opačném směru

Pro přesnou funkci harmonických převodovek je potřeba zajistit souosost všech členů!



Obr. 13 Souosost členů

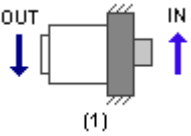
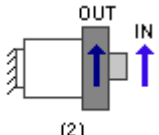
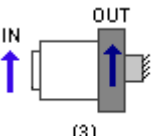
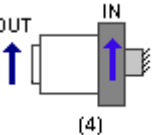
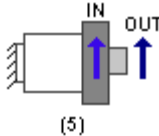
3.4 Vlastnosti harmonických převodovek

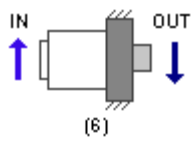
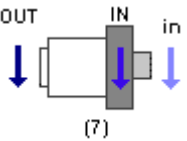
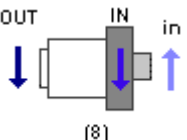
3.4.1 Převodový poměr

Harmonické převodovky se vyznačují možností vysokého převodového poměru. V jednom stupni je možné dosáhnout s komponenty harmonických převodovek převodový poměr až 160, přitom jsou tyto převodovky menší a lehčí než klasické převodové mechanismy.

3.4.1.1. Vliv aplikace komponentů na převodový poměr

Komponenty harmonických převodů je možno aplikovat v různém spojení. Viz tab. 1.

 <p>(1)</p>	<p>1) Reduktor otáček Tuhé ozubené kolo je fixované, vstup jde přes generátor vln a výstup je z pružného ozubeného kola. Vstup a výstup se otáčejí protiběžně. Převodový poměr $i = -Z_R/2$</p>
 <p>(2)</p>	<p>2) Reduktor otáček Pružné ozubené kolo je fixované, vstup jde přes generátor vln a výstup je z tuhého kola. Vstup i výstup se otáčejí stejným směrem. Převodový poměr $i = Z_G/2$</p>
 <p>(3)</p>	<p>3) Reduktor otáček Generátor vln je fixovaný, vstup jde přes pružné kolo a výstup je přes tuhé kolo. Vstup i výstup se otáčejí stejným směrem. Převodový poměr $i = Z_G/Z_R$</p>
 <p>(4)</p>	<p>4) Multiplikátor otáček Generátor vln je fixovaný, vstup jde přes tuhé kolo a výstup je přes pružné ozubené kolo. Vstup i výstup se otáčejí stejným směrem. Převodový poměr $i = Z_R/Z_G$</p>
 <p>(5)</p>	<p>5) Multiplikátor otáček Pružné ozubené kolo je fixované, vstup jde přes tuhé kolo a výstup je přes generátor vln. Vstup i výstup se otáčejí stejným směrem. Převodový poměr $i = 2/Z_G$</p>

	<p>6) Multiplikátor otáček Tuhé kolo je fixované, vstup jde přes pružné ozubené kolo a výstup je z generátoru vln. Vstup a výstup se otáčejí protiběžně. Převodový poměr $i = -2/ZR$</p>
	<p>7) Diferenciál Přes tuhé ozubené kolo jde vstup hlavního pohonu, z pružného kola jde výstup hlavního pohonu a přes generátor vln jde řídicí vstup. Četné funkce diferenciálu mohou být získány kombinací rychlosti a rotace na třech hřídelích. Výstupní rychlost $NR = NG \cdot (R+1)/R - NW/R$</p>
	<p>8) Diferenciál Přes tuhé ozubené kolo jde vstup hlavního pohonu, z pružného kola jde výstup hlavního pohonu a přes generátor vln jde řídicí vstup. Četné funkce diferenciálu mohou být získány kombinací rychlosti a rotace na třech hřídelích. Výstupní rychlost $NR = NG \cdot (R+1)/R + NW/R$</p>

Tab. 1 Konfigurace komponentů

Vysvětlení použitých zkratk naleznete v tabulce 2.

<p>ZR – počet zubů pružného ozubeného kola ZG – počet zubů tuhé ozubeného kola NR – rychlost pružného ozubeného kola</p>	<p>NG – rychlost tuhé ozubeného kola NW – rychlost generátoru vln $R = ZR/2$ (R – převodový poměr)</p>
--	---

Tab. 2 Vysvětlivky

3.4.2 Účinnost převodu

Účinnost sestavy komponentů harmonických převodovek je funkcí mnoha pracovních podmínek. Mezi hlavní činitele ovlivňující účinnost patří:

- zatížení převodu
- množství a viskozita použitého mazacího prostředku
- vstupní otáčky

Vyšší účinnosti se dosahuje při nižších otáčkách, nižší viskozitě oleje a při vyšších převodech. Při splnění těchto podmínek může být účinnost až 90%.

3.4.3 Mrtvý chod a tuhost

Mrtvý chod harmonického převodu je pohyb pomaloběžné hřídele vyjádřený v radiánech při zafixované rychloběžné hřídeli a při stanoveném zatížení. Mrtvý chod se skládá ze skutečné vůle v ozubení a deformace celého systému. Může se měnit v závislosti na poloze členů (generátor vln, pružné ozubené kolo, tuhé ozubené kolo). Maximální hodnota mrtvého chodu je pro harmonické převody $v_{\max} = 8,7 \cdot 10^{-4}$, tzn. 3 úhlové minuty. Z tohoto vyplývá, že harmonické převody jsou velmi přesné, což je také jednou z jejich předností.

3.4.4 Přetížitelnost převodu

Krátkodobá přetížitelnost až o dvojnásobek tabelovaného krouticího momentu v sekundovém rozsahu nemá podstatný vliv na životnost převodu. Dovolená statická přetížitelnost převodu je dvojnásobná.

3.4.5 Životnost převodu

Životnost harmonického převodu, stejně jako u ostatních převodů, závisí na charakteru jeho zatěžování, použití vhodného mazacího prostředku a kinematické vazbě mezi jednotlivými komponenty. Závislost mezi životností převodu a velikostí zatížení je kubická. Tzn., že při zatížení převodu 0,8 M se životnost prodlouží na dvojnásobek a při zatížení na 0,5 M dokonce na osminásobek původní životnosti při zatěžování nominálním krouticím momentem M. Životnost převodu se dá tedy ovlivnit správnou volbou velikosti převodu a dodržováním předpisů pro montáž a údržbu.

3.4.6 Ostatní vlastnosti

Možnost reverzace – harmonické převodovky jsou reverzibilní. Mohou se zatěžovat v dané poloze po zabrzdění příslušné části převodu.

Nízká hmotnost – harmonické převodovky jsou lehčí a menší než klasické převodové mechanismy, což je velkou předností při navrhování lehkých a kompaktních konstrukcí.

Vysoký krouticí moment – 15 až 20% zubů v záběru (u ozubení typu „IH“ až 30%) umožňuje přenos vysokých krouticích momentů bez rizika opotřebení zubů. Harmonické převodovky se právem nazývají „převodovkami vysokých krouticích momentů“.

4 TYPY HARMONICKÝCH PŘEVODOVEK

Systém harmonických převodovek *HARMONIC-DRIVE* je patentován a jediným celosvětovým výrobcem je společnost *Harmonic Drive AG*.

4.1 Komponenty H-D převodovek

Jak se postupně vyvíjel trh a jeho požadavky, tak se i harmonické převody musely zdokonalovat. Vývoj se soustředil na přesnost, efektivitu, zvyšování přenášeného krouticího momentu a životnost komponentů. Dále byly vyvinuty komponenty velmi tenké pro úsporu místa a také komponenty s možností vedení hřídele středem celku. Nyní si přiblížíme možnosti a vlastnosti jednotlivých komponentů.

4.1.1 Řada HFUC

Tato řada je výsledkem postupného vývoje harmonických redukčních převodů. HFUC má zkrácené pružné ozubené kolo oproti předchůdcům, což se projeví hlavně v axiální délce komponentů. Díky přesnému profilu zubů je zvýšena horní hranice krouticího momentu, který lze přenést.

Výhody:

- Přenos vysokého krouticího momentu
- Vysoká poziční přesnost a opakovatelnost
- Kompaktní design
- Vysoký převodový poměr v jednom stupni
- Vysoká torzní tuhost
- Nulový mrtvý chod
- Vysoká účinnost
- Jednoduchá montáž



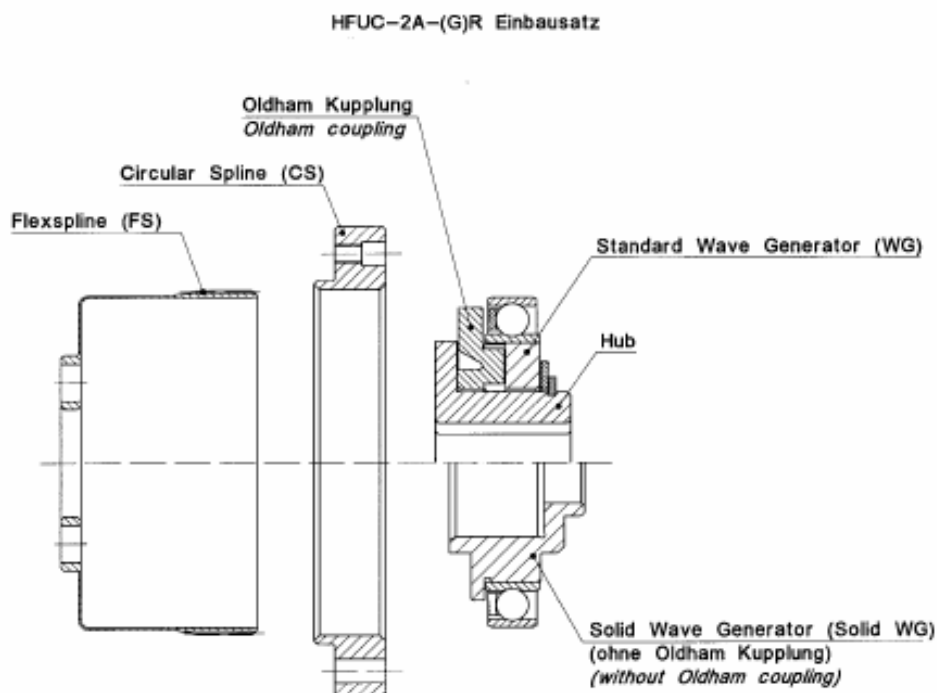
Obr. 14 Řada HFUC

Parametry:

- Velikost: 8 až 100
- Převodový poměr: 30 až 160 (dle velikosti)
- Nominální výstupní krouticí moment: (0,9 až 3550)Nm (dle velikosti)



Obr. 15 Řez HFUC



Obr. 16 Náskres HFUC

4.1.2 Řada CSG

U této řady byla významně navýšena hranice přenositelného krouticího momentu a také životnost v porovnání s řadou HFUC. Tato ústrojí mohou být optimálně použita v podavačích a robotice.

Výhody:

- Nárůst přenositelného krouticího momentu a životnosti
- Vysoká poziční přesnost a opakovatelnost
- Kompaktní design
- Vysoký převodový poměr v jednom stupni
- Vysoká torzní tuhost
- Nulový mrtvý chod
- Vysoká účinnost



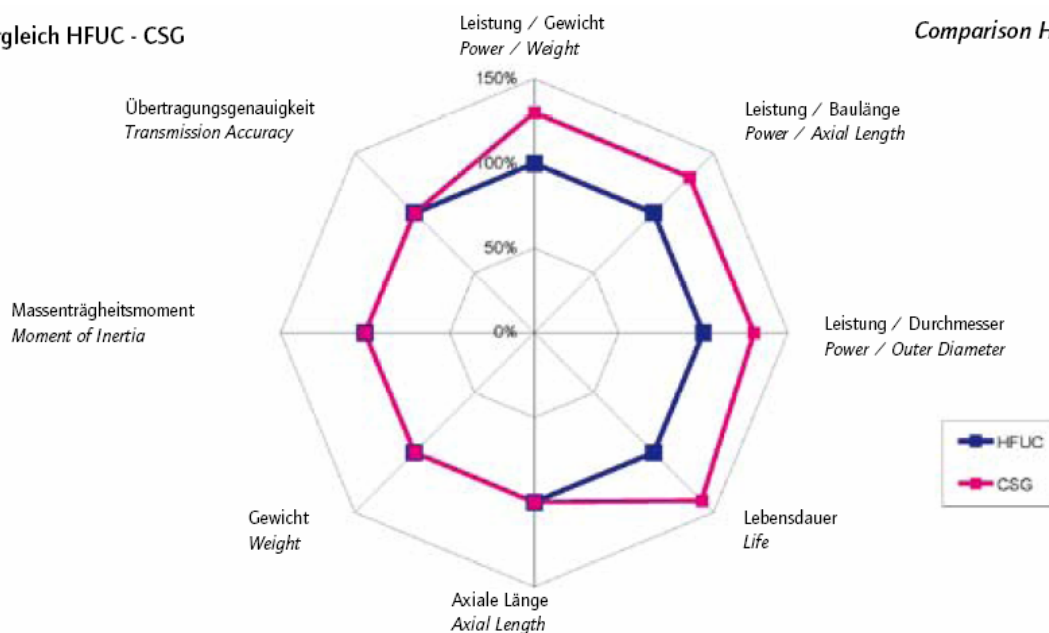
Obr. 17 Řada CSG

Parametry:

- Velikost: 14 až 65
- Převodový poměr: 50 až 160 (dle velikosti)
- Nominální výstupní krouticí moment: (23 až 3263) Nm (dle velikosti)

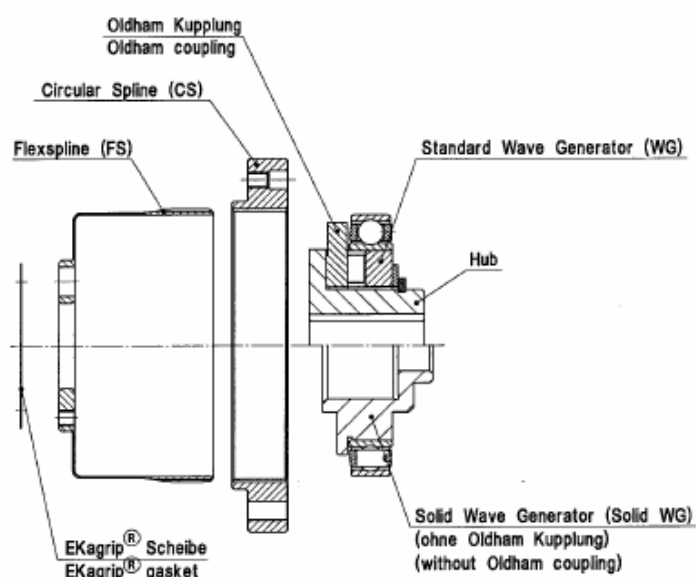
Vergleich HFUC - CSG

Comparison HFUC - CSG



Graf 1 Porovnání charakteristik HFUC a CSG

CSG-2A-(G)R-E Einbausatz / Component Set



Obr. 18 Náskres CSG

4.1.3 Řada CSD

Hlavním rozdílem CSD řady v porovnání s HFUC je redukce axiální délky téměř o 50%. Je dostupné také provedení s dutou hřídelí.

Výhody:

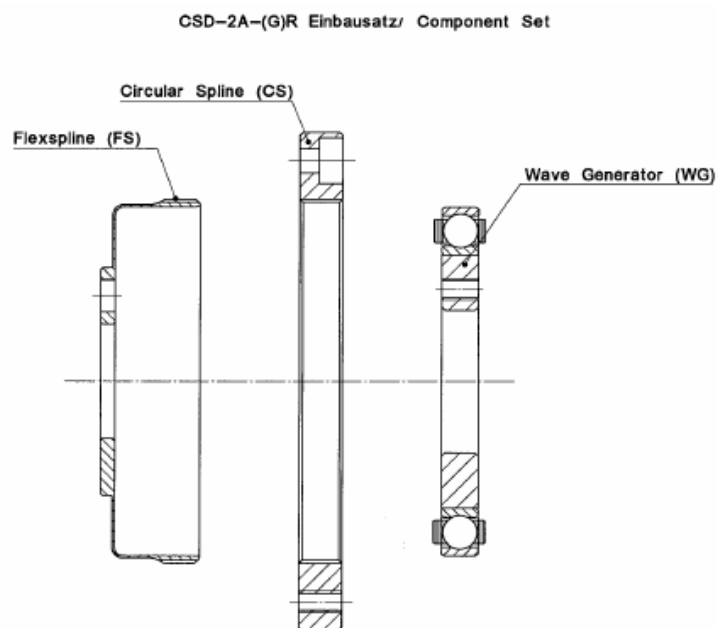
- Velmi kompaktní design a velmi malá axiální délka
- Nízká hmotnost
- Možnost provedení s dutou hřídelí
- Vysoká poziční přesnost a opakovatelnost
- Vysoký převodový poměr v jednom stupni
- Nulový mrtvý chod
- Vysoká účinnost



Obr. 19 Řada CSD

Parametry:

- Velikost: 14 až 50
- Průměr duté hřídele: (11 až 50) mm (dle velikosti)
- Převodový poměr: 50 až 160 (dle velikosti)
- Nominální výstupní krouticí moment: (3,7 až 823) Nm (dle velikosti)



Obr. 20 Náskres CSD

4.1.4 Řada HFUS

Tato řada byla vyvinuta z prověřené řady HFUC. Technické parametry jsou u obou řad stejné a hlavní rozdíl mezi nimi je ve tvaru pružného ozubeného kola. Výstup z něj je možný na hřídel velkého průměru.

Výhody:

- Možnost provedení s dutou hřídelí velkého vnitřního průměru
- Přenos vysokého krouticího momentu
- Vysoká poziční přesnost a opakovatelnost
- Kompaktní design
- Vysoký převodový poměr v jednom stupni
- Vysoká torzní tuhost
- Nulový mrtvý chod
- Vysoká účinnost



Obr. 21 Řada HFUS

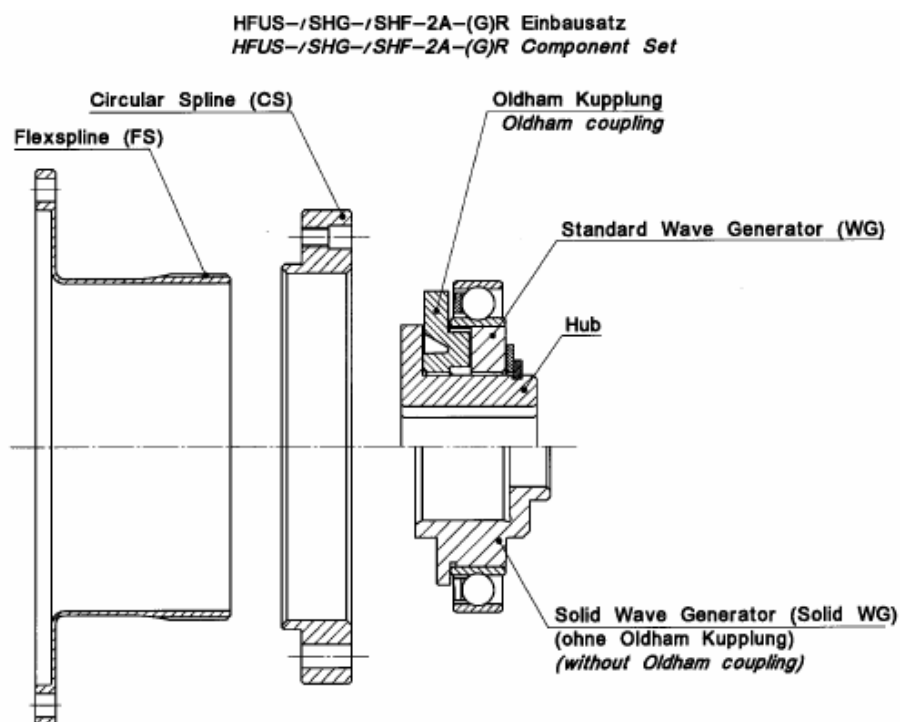


Flexspline Circular Spline Wave Generator

Parametry:

- Velikost: 14 až 58
- Převodový poměr: 50 až 160 (dle velikosti)
- Nominovaný výstupní krouticí moment: (5,4 až 745) Nm (dle velikosti)

Obr. 22 Elementy HFUS



Obr. 23 Náskres HFUS

4.2 Typy převodovek

Tyto převodovky jsou kompletovány z komponentních setů (viz kapitola 4.1 Komponenty H-D převodovek) a převodových skříní s přírubou nebo hřídelí na výstupu.



Obr. 24 Logo H-D převodovek

4.2.1 Řada PMG

Řada PMG se skládá z komponentů řady HDUC, převodové skříně a výstupní hřídele a vytváří tak jednotku velmi malých rozměrů. Tato řada poskytuje vysokou přesnost a kompaktní rozměry.

Výhody:

- Přenos vysokého krouticího momentu
- Vysoká poziční přesnost a opakovatelnost
- Kompaktní design
- Vysoký převodový poměr v jednom stupni
- Vysoká torzní pevnost
- Nulový mrtvý chod
- Vysoká účinnost
- Robustní konstrukce
- Jednoduchá montáž k servomotorům



Obr. 25 Převodovka PMG

Parametry:

- Velikost: 5 až 14
- Převodový poměr: 50 až 110 (dle velikosti)
- Nominální krouticí moment: (0,2 až 7,8) Nm (dle velikosti)

4.2.2 Řada CSF

Tyto mini převodovky jsou díky komponentům řady HFUC užší, s větší přesností, s vyšším přenositelným krouticím momentem a větší torzní tuhostí oproti předchozím typům a také jsou schopny pojmout vyšší maximální vstupní rychlosti. Při nově představeném převodovém poměru 30:1 mohou být převodovky CSF použity i s poměrně vysokou výstupní rychlostí. Velmi tuhé čtyřhranné přírubové ložisko bylo speciálně vyvinuto pro výstup, proto je výstupní element k dostání s hřídelí nebo přírubou. Vstup může být buď přes hřídel, nebo přes přímo připojený motor.

Výhody:

- Velmi kompaktní design
- Převod bez mrtvého chodu s možností přenosu vysokého krouticího momentu, se zvýšenými mezními rychlostmi, tomu odpovídající torzní tuhostí a přesností
- Čtyřhranné tuhé výstupní ložisko s možností výstupu na hřídel nebo na přírubu
- Různé možnosti pro vstupní a výstupní elementy
- Velmi nízká hmotnost, pro kterou se hodí pro zařízení,
- kde je právě toto důležité



Obr. 26 Převodovka CSF

Parametry:

- Velikost: 3 až 14
- Převodový poměr: 30 až 100 (dle velikosti)
- Nominální krouticí moment: (0,06 až 7,8) Nm (dle velikosti)

4.2.3 Použití H-D převodovek

- Karusely s malou úhlovou rychlostí, základní osy pomaloběžných svařovacích robotů, osy portálových robotů
- Měníče palet, dynamické měniče nástrojů, lešticí roboty, základní osy svařovacích robotů (svařování laserem)
- Osy B a C pěti-osých brusek, osy koncového prvku svařovacího robotu (svařování laserem), mlecí hlavy pro zpracování plastů
- Osy C na soustruhu, mlecí hlavy pro zpracování lehkých kovů a dřeva

Možnost použití je rozlišena frekvencí, za které jednotlivé stroje pracují.

4.3 Planetové převodovky řady HPG

Díky použití pružného korunového kola dosahují tyto planetové převody mrtvého chodu menšího než jedna úhlová minuta bez přídavného mechanismu na eliminaci mrtvého chodu. Dříve bylo většinou potřeba tento použít pro minimalizaci mrtvého chodu. Těsné vazby běžných planetových převodovek vedou k torznímu vlnění, vyšší hlučnosti a opotřebení. Pro vyhnutí se tomuto problému má řada HPG pružné korunové kolo s vnitřním ozubením. Pružné korunové kolo zajišťuje, že jsou všechny elementy planetového převodu zatíženy stejnoměrně.

Výhody:

- Mrtvý chod menší než jedna úhlová minuta
- Vysoká momentová tuhost
- Vysoká účinnost
- Opakovatelnost lepší než 20 úhlových sekund
- Lehká montáž motoru



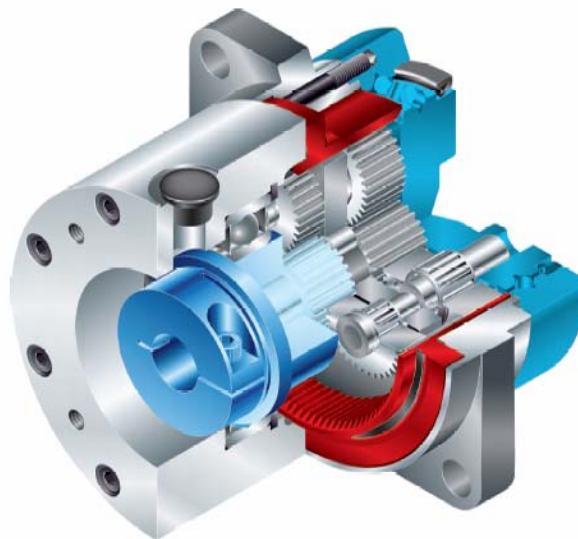
Obr. 27 Planetová H-D převodovka

Parametry:

- Velikost: 11 až 65
- Převodový poměr: 5 až 45 (dle velikosti)
- Nominální výstupní krouticí moment: (2,5 až 850) Nm (dle velikosti)

Použití planetových H-D převodovek:

- Lineární osy robotů
- Nakládací a vykládací zařízení
- Roboty pro zacházení s vodou
- Revolverové hlavy
- Pohony lisu



Obr. 28 Řez planetovou H-D převodovkou

4.4 Servomotory, servo ovládací prvky a regulátory

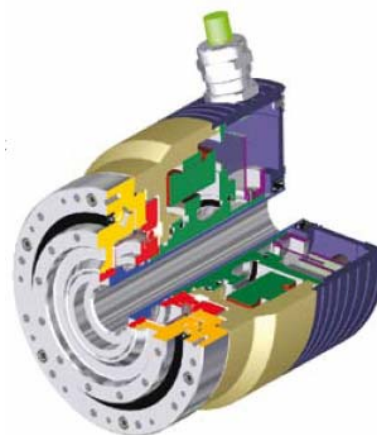
Další možností využití harmonických převodovek jsou právě tyto případy.

Řady CHA a FHA-C akčních členů s dutou hřídelí jsou kombinací bezúdržbového motoru a harmonického převodu v kompaktním designu. Centrální dutá hřídel umožňuje vedení např. kabelů, trubek, hřídelí, včetně nebo laserových paprsků skrz akční člen.



Obr. 30 Řada FHA-C

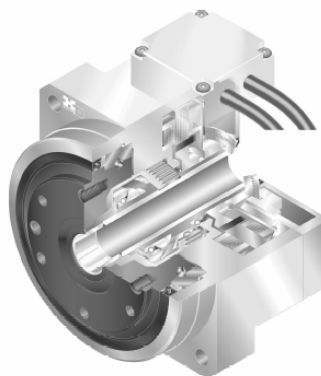
U těchto řad jsou hlavními výhodami nulový mrtvý chod, dutá hřídel s průměrem od 18 mm do 45 mm, vysoká přesnost a opakovatelnost, vyšší torzní tuhost, kompletní protikorozní ochrana a ostatní výhody vztahující se k harmonickým převodům. Řada FHA-C má ovšem ještě vyšší maximální rychlost než CHA. U CHA je maximální přenositelný krouticí moment 1840 Nm a je zde možnost výběru z pěti velikostí. U FHA-C je maximální přenositelný krouticí moment 823 Nm a výběr ze čtyř velikostí.



Obr. 29 Řada CHA

Motor CHM je bezrámový pro jednoduchou aplikaci do stroje či zařízení. Výhodami této řady jsou velká dutá hřídel, kompaktní design, bezúdržbovost, rychlost až 6500 ot/min a variabilní uspořádání převodové skříně díky příslušenství dodávanému samostatně.

Řada FHA-C mini je servo akční člen složený z přesného harmonického převodu a stejnosměrného servomotoru. Hlavní výhodou jsou malé rozměry a obzvláště ploché uspořádání.



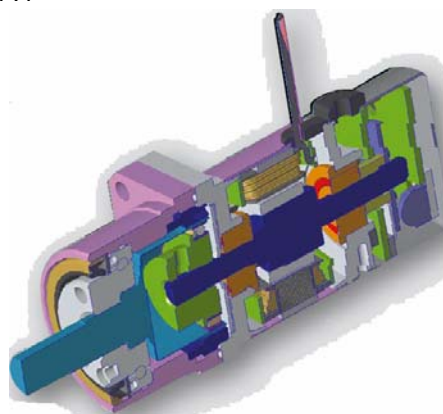
Obr. 31 Řada FHA-C mini

Akční člen FPA je tvořen planetovou harmonickou převodovkou a stejnosměrným motorem. Opět je zde patrný kompaktní design, kde je člen FPA schopen vyvinout výstupní krouticí moment až 300 Nm a poskytnout při tom vysokou výstupní rychlost až 1111 ot/min.



Obr. 32 Řada FPA

Kombinace převodovek CSF (viz kapitola 4.2.2) a stejnosměrného motoru vytvořila řadu RSF Supermini, která se vyznačuje hlavně mimořádně kompaktním designem a velmi nízkou hmotností.



Obr. 33 Řada RSF Supermini

Řada PMA DC-Mini je tvořena harmonickou převodovkou malých či velmi malých rozměrů (mini / supermini) v kombinaci se střídavým servomotorem a zařízením pro zpětnou vazbu.



Obr. 34 Řada PMA DC-Mini

5 SROVNÁNÍ RŮZNÝCH TYPŮ PŘEVODOVEK S HARMONIC-DRIVE

Postupným vývojem harmonických převodovek dochází ke změně rozměrů při zachování stejných parametrů či jejich zlepšení. Proto můžeme H-D převodovky rozdělit podle zástupců zmiňovaných skupin podle axiální délky pružného ozubeného kola.

Řada HFUC je zástupcem převodovek se standardním pružným kolem, a jak již bylo popsáno v kapitole 4.1.1, vyznačuje se vlastnostmi, jako jsou vysoká poziční přesnost a opakovatelnost, vysoká účinnost atd. a možností přenosu krouticího momentu až 3550 Nm.

Řada CSD (kap. 4.1.3) je zástupcem druhé skupiny, a sice se zkráceným pružným kolem. Hlavním významem a výhodou tohoto typu je velmi malá axiální délka pružného ozubeného kola, díky které je řada CSD o 50% kratší než řada HFUC. Kromě rozšíření použití díky menšímu zastavěnému prostoru se zvýšila i přesnost a torzní tuhost. Na druhou stranu je ale tento typ náročnější na výrobu, protože deformace pružného ozubeného kola probíhá na menším rameni a tomu je právě nutné přizpůsobit postup výroby.

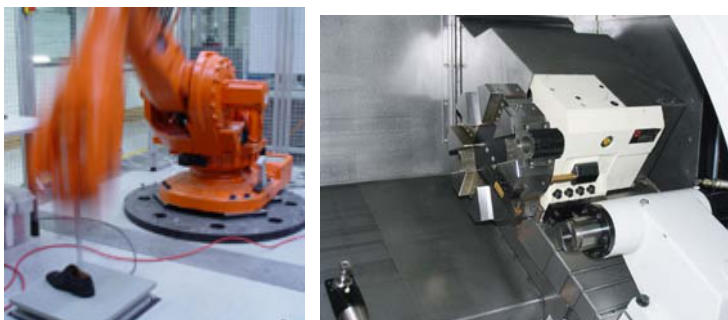
Ve srovnání s klasickými převodovkami je nespornou výhodou úspora místa potřebného pro instalaci H-D převodovek, dále také výrazné snížení váhy, velice přesný chod, vysoká opakovatelnost, nízké opotřebení a vysoká účinnost. Harmonické převodovky mají vyšší převodový poměr v jednom stupni a také souosost elementů může být výhodou. Harmonické převodovky jsou ovšem náročnější na výrobu než převodovky klasické. Je zde nutné dodržet souosost prvků, instalovat speciální ložisko a výroba přesné eliptické vačky je také náročná. Ale i přes to mají pevnou pozici na trhu díky svým parametrům.

Další převodovky, se kterými můžeme harmonické srovnat, jsou převodovky cykloidní. Jak jsem již při popisu cykloidního ozubení uvedl, jeho použití vykazuje menší ztráty třením a menší opotřebení než ozubení evolventní. Poskytuje také vysokou účinnost a přesnost, je ovšem ještě náročnější na výrobu. Cykloidní převody nejsou zatím tolik rozšířené, ale i přesto se dá říci, že cykloidní převodovky jsou konkurentem převodovek harmonických.

6 PŘÍKLADY POUŽITÍ PŘEVODOVEK HARMONIC-DRIVE

Využití těchto převodovek je v robotice, automatizované výrobě a jiných odvětvích, kde je zapotřebí přesný pohyb. Mohou to být roboty například v automobilovém průmyslu, tiskařské stroje, pohony revolverových hlav soustruhů nebo také pohony svařovacích automatů.

Konkrétní příklady jsou na obrázku 35.



Obr. 35 Příklady použití

7 ZÁVĚR

Tyto převodovky jsou již velice rozšířené v robotice a také letectví a postupně se dostávají i do dalších aplikací, jako například pohony revolverových hlav soustruhů a další. Jsou sice náročnější na výrobu a tím je jejich pořizovací cena vyšší, toto je ale vykoupeno vlastnostmi a parametry těchto převodovek. Jsou schopny poskytnout vysoký převodový poměr v jednom stupni, přesný pohyb, vysokou opakovatelnost, nulový mrtvý chod, možnost použití duté hřídele a další. Toto vše je ovšem ve velice kompaktním designu, kdy například nejmenší harmonická převodovka má vnější průměr skříně 30 mm. Je tedy zřejmé, že hlavní výhodou jsou velmi malé rozměry a nízká hmotnost, což je důvodem jejich využití například také v letectví, kde každý gram hraje roli. Dále se tyto převody vyznačují téměř bezúdržbovým provozem a při optimálních podmínkách provozu, jako jsou dodržení nominovaného krouticího momentu, použití správného maziva a dodržení předpisů pro montáž, dlouhodobou životností. Výrobce také dodává převodovky přímo v kombinaci se servomotorem, kde tedy odpadá nutnost výběru samostatného servomotoru od jiného výrobce, což by mohlo vést ke změně vstupních parametrů a mohlo by ovlivnit správnou funkci a životnost převodu.

Harmonické převody se dále vyvíjí, rozvoj je ale ovlivněn existencí jediného výrobce na světě, který vlastní patent a tak znemožňuje proniknout dalším firmám na trh. Z důvodu právě tohoto omezení se setkáváme s nedostatkem podrobných informací o těchto převodech. Nejpresnější fakta se dají čerpat pouze z katalogu firmy *Harmonic Drive AG* a i zde je vše zastřeno licenčními právy.

Z dostupných informací je však zřejmé, že si tento převod stále hledá uplatnění v dalších odvětvích průmyslu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZTS ZÁVODY ŤAŽKÉHO STROJÁRSTVA. *Návod na montáž a údržbu komponentov harmonických prevodoviek*. ZTS Závody ťažkého strojárstva, 1990.
- [2] ZTS ZÁVODY ŤAŽKÉHO STROJÁRSTVA. *Harmonické prevodovky*. ZTS Závody ťažkého strojárstva, 1990.
- [3] DONNER, D., SEIREG, A. *The Kinematic geometry of gearing*. A Wiley-Interscience publication, 1995. ISBN 0-471-04597-7
- [4] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ FSI VUT v Brně - prezentace k výuce
<http://www.uk.fme.vutbr.cz/>
- [5] ÚSTAV MATEMATIKY FSI VUT v Brně – online skripta
<http://www.mathonline.fme.vutbr.cz/>
- [6] HARMONIC DRIVE AG – katalogy
<http://www.harmonicdrive.de/>
- [7] HARMONIC DRIVE LLC – katalogy
<http://www.harmonicdrive.net/>